DOI: 10.3901/JME.2015.16.196

基于关联分析的机械产品质量特性波动消解*

段桂江¹ 王洋²

(1. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院 北京 100191;

2. 北京自动化控制设备研究所 北京 100074)

摘要: 对基于关联分析的机械产品质量特性波动消解技术与方法进行研究。引入链接对象作为质量特性关联关系的基本封装单元,并构建链接矩阵和链接网络模型对质量特性波动传播与消解进行建模与分析。在此基础上,对质量特性波动消解机理进行探究,提出质量特性波动的源头消解和路径消解策略,并对质量特性波动消解的典型技术进行归纳。在定义波动消解空间、消解单元、消解路径和消解方案的基础上,构建质量特性波动消解过程模型,给出波动在链接网络之间的传播度,并阐述波动消解方案优选的最小风险原则,通过案例进行验证。

关键词: 质量特性; 链接模型; 波动消解; 消解机理; 消解策略

中图分类号: TH122

Mechanical Product Quality Characteristic Variation Mitigation Based on Linkage Model

DUAN Guijiang¹ WANG Yang²

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Beihang University, Beijing 100191;

2. Beijing Institute of Automatic Control Equipment, Beijing 100074)

Abstract: A method of mechanical product quality characteristic variation mitigation based on linkage model was studied. Linkage object was constructed as the basic encapsulation unit and linkage matrix and network models are built to support for variation propagation and mitigation analysis. On the basis of the linkage model, the mechanisms of variation mitigation are analyzed, the variation mitigation strategies by source and path are proposed and the typical variation mitigation technologies are concluded. In the following, the variation mitigation process model is described with the definitions of variation mitigation space, mitigation unit, mitigation path and mitigation plan, the variation propagation probability is calculated and the minimum risk principle of variation mitigation plan selection is given. A case study is provided to validate the effectiveness of variation mitigation based on linkage model.

Key words: quality characteristic; linkage model; variation mitigation; mitigation mechanism; mitigation strategy

0 前言

产品研发过程中,知识、经验的不足以及多种因素的扰动均可能引发质量问题。质量问题在本质上可以理解为质量特性波动超出容限阈值的表象。机械产品质量特性之间存在多维、多阶的关联关系^[1-4],引发质量问题的特性波动往往不是孤立发生的,而是一个或多个深层次的源波动经多级传递、耦合、叠加、振荡、放大所引发的综合效应。基于

质量特性间关联关系对质量特性波动传播及其消解进行研究,有助于深入机理层面解决质量问题,进而改进设计方案,提升产品研发质量。

质量特性关联关系建模是波动传播的介质与波动控制与消解的基础。质量功能配置^[5]、设计结构矩阵^[6]、产品属性与特征建模^[7]等基于矩阵结构对产品特性关联进行建模;RedesignIT有向依赖图模型^[8]、质量特性演进^[9]以及用于设计更改传播分析的特性关联模型^[10]等基于层次网络结构对产品特性关联进行建模,均为本文波动消解中的质量特性关联建模提供了有益思路。

在质量特性波动消解方面,麻省理工学院学者

* 国家自然科学基金资助项目(51175025)。20140805收到初稿,20150122收到修改稿

ANNA^[11]基于关键特性波动分解,提出了波动风险管理理论,并研究了在设计、制造和装配各阶段中的消解策略;文献[12]中借鉴生物免疫思想,提出了关键质量特性免疫识别、排斥、记忆和自适应调节的质量特性波动消解模型。

此外,另外一些学者则从波动预防角度进行了研究,如致力于降低产品波动敏感度的稳健设计^[13-14]、试验设计^[15],减少和合理配置产品特性间关联与耦合的公理设计^[16]、解耦设计^[1]、模块化设计^[17]等。

本文试图引入链接模型对质量特性耦合及其波动传播关系加以描述,对质量特性波动消解机理、消解策略、消解过程以及消解方案优选进行研究,以期为机械产品研发过程质量问题分析与处理提供一种技术途径。

1 质量特性链接模型

文献[18]中将机械产品质量特性之间的关联关系描述为构成关系和约束关系两种主要类型。构成关系形成于质量特性的映射、转化、分解、传递、配置或派生过程中,是机械产品特性关联的主要类型;而约束关系则强调质量特性之间的相互配合、约束关系,例如尺寸之间的配合、输入输出特性之间的匹配等。论文面向质量特性波动传播与消解分析的需求,提出链接对象的概念,对质量特性之间的各种构成和约束关系进行封装,并构建结构化的质量特性链接模型。

链接是质量特性间关联关系的基本封装单元,其中目标特性和设计特性用圆圈表示,特性之间的关联准则用矩形框表示,特性与关联准则之间的连接用箭头表示。机械产品质量特性间的构成关系和约束关系均可基于链接模型进行表达,如图1所示。其中,质量特性约束关系可通过派生新的目标特性转化为构成关系。 P_w 为电动机输出功率, F 为传送带有效拉力, v 为传送带线速度。

如果链接中目标特性用 y 表示,设计特性用 x_i 表示,则链接可表示为 $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 。其中 $f(\bullet)$ 表示质量特性之间的构成或约束准则。在机械产品研发过程中,链接准则可定性或定量,显式或隐式,取决于设计人员设计知识储备以及链接类型。为满足质量特性波动传播及其消解的需要,给出如下定义。

(1) 链接波动消解代价。当链接中的特性发生波动时,链接的稳定状态遭到破坏,为使链接恢复

稳定状态进行调整所付出的成本,称为链接的波动消解代价,记为 c_s 。在质量特性波动消解过程中,调整不同的特性或特性组合使得链接恢复稳定状态的成本是不同的,在理论上链接的波动消解成本为使该链接恢复稳定状态的最小成本。链接的波动消解代价取值范围介于[0,10]之间,可由专家打分得到。

图1 特性构成关系和约束关系向链接的映射转换

(2) 特性对链接的贡献度。对于一个稳定状态遭到破坏的链接而言,其产生的波动向各特性传播的强度是不同的,在此,定义贡献度用以刻画链接波动向各特性传播的强弱程度,记为 c_n 。特性对链接的贡献度取值范围介于(0,1)之间:对于量化表达的链接准则,可通过目标特性对设计特性的偏微分得到,即对于无法定量表达的链接准则,可由专家打分得到。规定链接中的目标特性对链接的贡献度为1。

(3) 链接的波动灵敏度。链接波动灵敏度在本质上体现了链接对特性波动的传播能力大小,记为 s_n 。链接波动灵敏度取决于链接关系类型以及链接中各设计特性的波动敏感度,取值范围介于[0,1]之间,在产品研发过程产品信息不足的情况下,可由专家打分定性得到。

在机械产品研发过程中,质量特性演进形成各种链接;同时链接之间也通过耦合和嵌套,形成复杂的链接网络。链接网络是基于链接对特性关联关系的形象化表述,为便于存储与计算,可将其转化为结构化的链接矩阵,如图2所示。链接模型是质量特性波动消解的基础,有关详细内容已在文献[19]中进行说明,论文不再展开。

2 基于关联分析的质量特性波动消解机理

机械产品质量特性间存在各种耦合关联关系,链接网络中某一质量特性的波动,会引发相邻特性或链接的波动,进而产生耦合传播效应。链接网络

图 2 质量特性链接模型：链接网络和链接矩阵

中底层设计特性波动，经链接网络传递、耦合、叠加和振荡后引发顶层目标质量特性波动，并以质量问题表征出来，论文将其称为质量特性原发性波动。

基于关联分析对质量特性原发性波动进行消

解，其主要思路就是消除底层设计特性波动或者阻断底层设计特性波动对顶层目标特性的影响效果。在本论文中，将质量特性波动消解划分为源头消解和路径消解两种策略，如图 3 所示。

图 3 质量特性波动的源头消解与路径消解

源头消解是指通过提取以波动源为目标特性的链接网络作为消解空间，对链接网络中的设计特性进行调整而直接消除波动源特性的影响。源头消解的关键在于选择易于被消解的设计特性，并确保这些消解措施不会产生新的衍生波动或者采取新的措施消除衍生波动，如图 3b 所示。

路径消解是指通过提取以波动源为设计特性的链接网络作为消解空间，对链接网络中其它的特性进行调整，从而阻断波动源特性对象特性的影响。路径消解是一种比较复杂的波动消解策略，其关键在于选取合理消解路径与消解点。路径消解适用于波动源特性为关重特性、冻结特性等不便或不能消解的情形，通过合理的波动传播阻断设计，可以在保留波动源特性波动水平的前提下，实现对象特性波动的消解，如图 3c 所示。

论文对面向特性关联的波动消解技术进行了分析，归纳出了其中典型的波动消解技术，包括质

量特性无耦合源头消解、波动补偿消解、波动分解消解、敏感度调节消解、链接准则调整消解、波动传播导向消解以及波动叠加效应消解等。

(1) 质量特性无耦合源头消解。通过引入独立的无耦合特性或组件，实现对波动源特性的消解。无耦合源头消解一般可通过增加新特性或新组件来完成，而这些特性或组件一般不会参与其它的链接组成。以发动机动力性能有效功率 P_e 的设计为例，冲量系数 Φ_e 是影响 P_e 的重要特性，根据 Φ_e 的链接准则，可通过增加独立无耦合的涡轮增压装置(带中冷器)来实现对进气状态下气体压力和温度的改变，提高冲量系数，进而获得更好的有效功率。涡轮装置以发动机排放的尾气为输入，不会引发衍生波动，如图 4 所示。

(2) 质量特性波动补偿消解。质量特性波动补偿消解是指通过引入低敏感度质量特性，将传播至此的波动予以减小或吸收，从而达到消除质量特性

图4 引入带中冷器的涡轮装置实现无耦合源头消解

波动的目的。低敏感度特性一般具有较强的波动吸收能力, 比如厚度调整垫圈、松紧调整螺杆等, 如图5所示。

图5 质量特性波动补偿消解

(3) 质量特性波动分解消解。在链接模型的基础上, 对高层发生波动的质量特性进行波动分解, 从而得到底层各个波动, 进而采取措施进行消解。质量特性波动分解消解一般适用于重量配置、可靠性分配、能量损失、噪声等波动叠加的场景。以发动机的机械噪声为例, 在链接模型的基础上将其分解为活塞敲击噪声、齿轮啮合噪声、配气机构噪声、高压油泵噪声、轴承噪声、机体振动噪声等, 进而采取相应的措施进行消解, 如图6所示。

图6 质量特性波动分解消解

(4) 质量特性敏感度调节消解。在产品研发过程中, 质量特性在不同的取值区间内往往具有不同的波动灵敏度, 根据稳健设计思想, 利用链接的非线性效应将质量特性取值调整到波动灵敏度低的区间内, 从而有效抑制或消除质量特性的波动影响。在质量特性灵敏度调节过程中, 在将设计特性由高灵敏度区间调整至低灵敏度区间后会对目标特性带来影响, 需要寻找合理的措施对目标特性偏移进行补偿, 如图7所示。

图7 质量特性敏感度调节消解

(5) 链接准则调整消解。在质量特性波动消解过程中, 波动传播是基于链接进行的, 对链接准则进行调整也是一种行之有效的质量特性波动消解方法。比如改用波动不敏感的装配连接方式, 采用并联结构提高系统可靠性等, 如图8所示。

(6) 波动叠加效应消解。波动叠加是质量特性波动传播的一种典型效应, 多处设计特性的波动在目标特性处叠加后, 会产生增大、减小或低效的综合效应。在质量特性波动消解过程中, 基于波动叠加, 通过对多处设计特性的微小调整, 在目标特性处形成叠加效应, 进而降低或消除目标特性的波动, 如图9所示。

(7) 波动传播导向消解。在质量特性链接网络中, 特性之间存在链接关系是波动传播的必要条件, 在实际的消解过程中是否发生传播, 还取决于消解特性选取以及消解范围是否超出其容差阈值。通过合理选取消解特性并控制消解幅度, 将波动传播导

向至有具有低敏感度和灵敏度的质量特性或链接 图10所示。
处,从而有效减少或吸收质量特性的波动影响,如

图8 链接准则调整消解

图9 基于波动叠加效应的对波动进行组合消解

图10 基于特性选择的波动传播导向消解技术

无论采用何种波动消解技术,都会不可避免地引发相关新特性的波动,进而需要采取新的消解措施,论文将其称之为衍生性波动消解。衍生性波动消解与工程更改领域中的更改传播类似,具体可参考相关文献[10, 20-21],论文不再赘述。

3 质量特性波动消解过程建模

为便于对质量特性波动消解过程进行建模与分析,定义如下基本概念。

消解空间(Mitigation analysis space, MS)。在波动源特性和象特性的基础上,确定执行本次消解可能涉及到的所有特性及链接,并对其中不可消解的特性和链接(比如冻结、关重特性等)进行标记,从而形成消解空间。波动消解空间是质量特性链接网络的子网络,可用链接与特性的集合进行表示,即 $M_S = \{L, C\}$; 其中 L 表示消解空间中可行的链接集合, C 表示消解空间中可行的特性集合。

消解单元(Mitigation unit, MU)。质量特性波动消解过程中的基本分析对象,表示消解活动所施加

的对象, 在结构上可用链接与特性的二元组进行描述, 即 $M_U = \{L, C\}$ 。

消解路径(Mitigation path, MP)。在质量特性波动消解过程中, 往往需要对多个消解单元进行消解, 各消解单元依次组合, 从而构成了消解路径。消解路径表示某一消解支路的消解过程, 在结构上可描述为 $M_P = (M_U)_m^T = (L, C)_m^T$, 其中 m 表示消解路径中消解单元的数量。如图 11 所示。

图 11 波动消解单元 M_U 和消解路径 M_P

消解方案(Mitigation plan, ML)。在波动消解空间的基础上, 选择合理的消解策略进行波动消解, 多条消解路径交叉、组合, 从而构成本次的波动消

解方案。消解方案可用消解路径的有机组合表示, 即 $M_L = (M_P)_n$, 其中 n 表示消解方案中消解路径的数量。

在上述定义的基础上, 可以得到质量特性波动消解的过程模型, 如图 12 所示。

从图 12 中可以看出, 质量特性波动消解过程由消解空间确定、消解策略求解和消解方案生成三个阶段, 其中消解方案求解又可进一步分解为消解策略选取、消解路径确定和消解方案确定三个主要活动。

(1) 消解空间确定。在质量特性链接网络模型的基础上, 以波动源特性为中心提取链接子网络, 波动消解分析网络与周围链接的边界确定原则为: 不存在链接关联、存在冻结或关键等不能被消解的特性、低灵敏度链接不足以进行波动传播等。消解范围网络要根据实际的波动消解情况进行确定, 范围过大时增加分析、求解的复杂度, 范围过小有可能导致消解不成功。

图 12 质量特性波动消解过程建模

(2) 消解策略选取。根据第 2 节可知, 质量特性波动消解可分为源头消解和路径消解两种策略, 也有可能针对同一波动源同时采用两种消解策略。一般情况下, 建议采用源头消解策略; 如果源头消解不成功时, 再考虑较为复杂的路径消解策略。

(3) 消解路径确定。在消解策略选定的基础上, 根据消解风险最小原则选择最优的波动消解技术, 对波动所涉及的消解单元逐一进行消解, 从而构成波动消解路径。

(4) 消解方案确定。在消解路径确定的基础上, 通过消解路径的有机组合, 确定此次波动的消解方案。

(5) 消解方案生成。在波动消解策略求解的基础上, 构建消解方案的网络模型, 给波动消解过程

以形象、直观的支持。

4 波动消解方案优选

在质量特性波动消解过程中, 对于同一波动源 $V_S = (L, C)$, 往往会存在不同的波动消解方案。如何从众多消解方案中, 选择最佳或最优的方案是一个亟待解决的问题。常见的波动消解原则包括最小消解风险、最高消解效率、无耦合消解、低灵敏度链接优先等^[18], 本文主要研究消解方案最小风险原则。

论文借鉴 FMEA 中风险定义^[22], 将消解风险 r_i 定义为消解传播可能性 l_y 与消解代价 c_s 的乘积。质量特性波动消解方案可视为链接串联、并联或混

联形成的复杂网络。记链接波动灵敏度为 s_n ，则在如图 13 所示的不同构成下，链接波动传播度 l_y 计算公式定义如下。

图 13 不同链接构成下波动传播度计算

在单一链接中，源特性 x_1 向象特性 y 的波动传播度 $l_y(x_1, y)$ 计算公式为

$$l_y(x_1, y) = \lambda_{L1} \quad (1)$$

在质量特性链接串联中，源特性 x_2 向象特性 y 的波动传播度 $l_y(x_2, y)$ 计算公式为

$$l_y(x_2, y) = \frac{1}{(1/\lambda_{L1} + 1/\lambda_{L2})} = \frac{\lambda_{L1} \cdot \lambda_{L2}}{\lambda_{L1} + \lambda_{L2}} \quad (2)$$

在质量特性链接并联中，源特性 x_1 向象特性 y 的波动传播度 $l_y(x_1, y)$ 计算公式为

$$l_y(x_1, y) = \frac{1}{\left(\frac{1}{\lambda_{L1} + \lambda_{L2}} \right)} = \frac{\lambda_{L1} + \lambda_{L2}}{\lambda_{L1} \cdot \lambda_{L2}} \quad (3)$$

在质量特性链接混联中，源特性 x_2 向象特性 y 的波动传播度 $l_y(x_2, y)$ 计算公式为

$$l_y(x_2, y) = \frac{l_y(x_2, x_1) \cdot l_y(x_1, y)}{l_y(x_2, x_1) + l_y(x_1, y)} = \frac{1}{\frac{\lambda_{L3} \cdot \lambda_{L4}}{\lambda_{L3} + \lambda_{L4}} + \frac{\lambda_{L1} \cdot \lambda_{L2}}{\lambda_{L1} + \lambda_{L2}}} \quad (4)$$

式中， $l_y(x, y)$ 表示源特性 x 向象特性 y 的波动传播度。

依据上述波动传播可能度计算，消解单元 $M_U = (L, C)$ 的消解风险计算公式为

$$r_i(M_U) = l_y(L, C) \times c_s(L) \quad (5)$$

消解路径 $M_P = (M_{U1}, M_{U2}, \dots, M_{Un})^T$ 可视为 n 个消解单元的串联，其消解风险 $r_i(M_P)$ 计算公式为

$$r_i(M_P) = \sum_{i=1}^n r_i(M_{Ui}) = \sum_{i=1}^n l_y(M_{Ui}) \times c_s(M_{Ui}) \quad (6)$$

消解方案 $M_L = (M_{P1}, M_{P2}, \dots, M_{Pm})^T$ 的消解风险 $r_i(M_L)$ 可由 m 条路径的消解风险求和得到

$$r_i(M_L) = \sum_{i=1}^n r_i(M_{Pi}) \quad (7)$$

以图 12 所示场景为例，消解方案可表示为 $M_L = (M_{P1}, M_{P2})^T$ ，其中 $M_{P1} = (L_1, x_2; L_1, x_4)^T$ ， $M_{P2} = (L_2, x_5; L_3, x_{12})^T$ ，则消解方案总风险为

$$r_i(M_L) = r_i(M_{P1}) + r_i(M_{P2}) = \left\{ [c_s(L_1) \cdot c_n(x_2, L_1)] + s_n(L_1) \times [c_s(L_1) \cdot c_n(x_4, L_1)] \right\} + \left\{ \frac{1}{1/\lambda_{L1} + 1/\lambda_{L2}} \times [c_s(L_2) \cdot c_n(x_5, L_2)] + \frac{1}{1/\lambda_{L1} + 1/\lambda_{L2} + 1/\lambda_{L3}} \times [c_s(L_3) \cdot c_n(x_{12}, L_3)] \right\} \quad (8)$$

5 案例研究

发动机是汽车的重要总成部件之一，主要由“一机组、两机构、五系统”构成，通过进气、压缩、做功和排气冲程将燃料的化学能转换为机械能，从而驱动汽车前进^[23-24]。发动机研发过程中的典型特性如表 1 所示，主要的性能指标包括动力性指标，如有效功率 P_e 、空气压缩比 ε 、最大扭矩 M_{em} ；经济性指标如燃油消耗率 g_e 、机油消耗率 g_m ；质量、外形指标，如比质量 m_p 、体积功率 P_v ；低公害指标，如噪音声压级 L_n 、排放 L_w 等。在发动机研发质量特性演进分析的基础上，建立发动机质量特性链接网络模型，如图 14 所示。

表 1 发动机涉及的典型特性

特性名称	代号	特性名称	代号
进气状态压力	p_s	进气门迟滞角	α
进气门提前角	β	排气门迟滞角	γ
排气门提前角	δ	发动机转速	n
充气效率	η_v	空气压缩比	ε
进气状态温度	T_s	进气状态压力	p_s
排气状态温度	T_a	排气状态温度	p_a
残余废气系数	η_r	有效功率	P_e
平均有效压力	P_{me}	活塞平均速度	V_m
气缸数量	G_n	气缸直径	D
冲程数	T	指示热效率	η_i
充气效率	η_v	机械效率	η_m
燃料低热值	H_u	进气空气密度	ρ_s
空气过量系数	a_0	理论空气量	l_0
气缸工作容积	v_h	气缸壁厚	t
余隙容积	v_c	发动机转速	n
活塞行程	S	气缸燃烧压力	p_z
曲柄长度	l	润滑油品质	q_l
冷却液品质	q_f		

在发动机研发测试过程中, 发现发动机有效功率 P_e 不足, 进行波动溯源分析后, 确定波动源特性为充气效率 η_v 过低, 进而确定此次波动消解的消解空间 $M_S = \{L, C\}$, 如图 15 所示。

$$L = \{L_1, L_2, L_3, L_4, L_5, L_6, L_7, L_8\}$$

$$C = \{D, p_z, q_l, q_f, v_c, p_s, \alpha_0, l_0, S, t, T_s, p_a, T_a, \alpha, \beta, \gamma, \delta\}$$

在波动消解空间的基础上, 选择源头消解策略得到波动消解方案 M_{L1} , 即通过调整进气状态压力 P_s 来消解充气效率 η_v 的影响, 记为 $M_{L1} = (L_8, \alpha; L_8, \beta)^T$; 选择路径消解策略得到波动消解方案 M_{L2} , 通过调整气缸直径 D 来进行阻断充气效率 η_v 对有效功率 P_e 的影响, 记为 $M_{L2} = (L_1, D; L_6, S; L_6, t; L_2, q_f)^T$, 如图 16 所示。

图 14 发动机质量特性链接网络模型

图 15 质量特性波动消解分析网络

图 16 基于源头消解与路径消解策略的波动消解方案

波动消解过程中所涉及的相关数据如表 2 所示。

表 2 波动消解过程所涉及的数据

链接	灵敏度	消解代价	进气门迟滞角/(°)	进气门提前角/(°)	气缸直径/mm	活塞行程/mm	气缸壁厚/mm	冷却液品质
L_8	0.5	8	0.2	0.2	—	—	—	—
L_1	0.5	6	—	—	0.4	—	—	—
L_6	0.6	3	—	—	—	0.2	0.4	—
L_2	0.8	5	—	—	—	—	—	0.5

不同消解方案的消解风险计算公式如下

$$r_i(\mathbf{M}_{L1}) = c_s(L_8) \times c_n(\alpha, L_8) + c_s(L_8) \times c_n(\beta, L_8) = 8 \times 0.2 + 8 \times 0.2 = 3.2$$

$$r_i(\mathbf{M}_{L2}) = c_s(L_1) \times c_n(D, L_1) + s_n(L_6) \times c_s(L_6) \times c_n(S, L_6) + s_n(L_6) \times c_s(L_6) \times c_n(t, L_6) + \frac{s_n(L_6) \times s_n(L_2)}{s_n(L_6) + s_n(L_2)} \times c_s(L_2) \times c_n(q_f, L_2) = 6 \times 0.4 + 0.6 \times 3 \times 0.2 + 0.6 \times 3 \times 0.4 + \frac{0.6 \times 0.8}{0.6 + 0.8} \times 5 \times 0.5 = 4.34$$

对于消解方案 $\mathbf{M}_{L2}$, D 为底层设计特性, 对其进行调整会引起目标特性 ε 、 η_m 的恶化, 引发较大范围的波动传播与较大的消解风险。在消解方案风险计算的基础上, 选择消解方案 $\mathbf{M}_{L1}$, 即通过调整进气迟滞角 α 和进气提前角 β 实现对充气效率 η_v 的改善, 从而提高有效功率 P_e 。

6 结论

论文基于链接模型, 对质量特性波动传播及其消解机理进行了深入剖析, 讨论了波动消解的源头与路径消解策略, 并归纳了其中典型的波动消解技术。在质量特性波动消解机理剖析的基础上, 构建了波动消解过程模型, 给出了消解方案的结构化表达与最小风险优选原则。质量特性波动消解技术与产品领域知识的融合, 为机械产品研发过程中的质量问题分析与处理提供了一种思路。

参 考 文 献

- [1] 钟掘. 复杂机电系统耦合设计理论与方法[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.

ZHONG Jue. Complex electromechanical system coupling design theory and method[M]. Beijing: China Machine Press, 2007.

- [2] 张根保. 复杂机电产品质量特性解耦模型[J]. 重庆大学学报, 2010, 33(5): 7-15.

ZHANG Genbao. Decoupling model of quality characteristics for complicated electromechanical products [J]. Journal of Chongqing University, 2010, 33 (5): 7-15.

- [3] 段桂江. 基于归零模式的复杂产品研制质量问题处理

[J]. 计算机集成制造系统, 2008, 14 (1): 138-145.

DUAN Guijiang. Quality problem processing model based on zero-remains principle for complex product development[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2008, 14 (1): 138-145.

- [4] MOHAN S N. Managing unmanned flight projects using methods in complex product development [C]//Aerospace Conference Proceedings, IEEE, 2002(7): 3473-3488.

- [5] 车阿大, 杨明顺. 质量功能配置方法及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.

CHE Ada, YANG Mingshun. Quality function deployment and applications[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008.

- [6] STEWARD D V. The design structure system: A method for managing the design of complex system[J]. IEEE Transactions on Engineering Management, 1981, 28 (3): 71-74.

- [7] CHRISTIAN W, TILL D. New theory-based concepts for PDM and PLM [C/CD]//International Conference on Engineering Design, ICED 03 Stockholm, 2003.

- [8] GABRIEL A O, THOMAS F S. RedesignIT - A constraint-based tool for managing design changes [C/CD]// Proceedings of DETC'01 ASME 2001 Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, Pittsburgh, Pennsylvania, 2001.

- [9] WANG Meiqing, TANG Xiaoqing. Model of quality control in product collaborative design [C]//International Conference on Mechanical Engineering and Mechanics (ICMEM2005), October 26-28, 2005 Nanjing, China. 2005: 216-219.

- [10] YANG Fan, DUAN Guijiang. Developing a parameter

- linkage-based method for searching change propagation paths[J]. Res. Eng. Design, 2012, 23(4): 353-372.
- [11] ANNA C. Thornton, variation risk management: Focusing quality improvements in product development and production[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2004.
- [12] 纪富义. 产品加工过程关键质量特性提取及预防控制技术[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- JI Fuyi. Study on extraction and prevention-control of key quality characteristics in the product machining process [D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.
- [13] 陈立周. 稳健设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- CHEN Lizhou. Robust design [M]. Beijing: China Machine Press, 2000.
- [14] 吴扬东. 面向机械产品族的稳健设计技术研究及其在往复泵中的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- WU Yangdong. Research on robust design technologies for mechanical product family and application on reciprocating pump [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [15] 陈魁. 试验设计与分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- CHEN Kui. Design and analysis of experiments[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [16] SUH N P. Axiomatic design: Advances and applications [M]. New York: Oxford University Press, 2001.
- [17] 王海军, 孙宝元, 王吉军, 等. 面向大规模定制的产品模块化设计方法[J]. 计算机集成制造系统, 2004, 10 (10): 1171-1176.
- WANG Haijun, SUN Baoyuan, WANG Jijun, et al. Product module design method for mass customization production[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2004, 10 (10): 1171-1176.
- [18] 杨帆, 唐晓青, 段桂江. 基于特性关联网络模型的机械产品工程更改传播路径搜索方法[J]. 机械工程学报, 2011, 47(19): 97-106.
- YANG Fan, TANG Xiaoqing, DUAN Guijiang. Searching model of change propagation paths for mechanical product based on characteristic linkage network [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(19): 97-106.
- [19] 唐晓青, 王美清, 段桂江. 产品设计质量保证理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- TANG Xiaoqing, WANG Meiqing, DUAN Guijiang. Theory and method on product design quality guarantee [M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [20] CLARKSON P J, SIMONS C, ECKERT C. Predicting change propagation in complex design [J]. Journal of Mechanical Design, 2004, 126 (5): 788-797.
- [21] COHEN T, NAVATHE S B, FULTON R E. C-FAR change favorable representation[J]. Computer-Aided Design, 2000, 32: 321-338.
- [22] KMENTA S, LSHII K. Scenario-based FMEA: A life cycle cost perspective [C]//ASME Design Engineering Technical Conference, USA, Maryland, 2000: 1-11.
- [23] 韩同群, 姚胜华. 汽车发动机原理[M]. 北京: 北京大学出版社, 2007.
- HAN Tongqun, YAO Shenghua. Principles of autocar engine [M]. Beijing: Peking University Press, 2007.
- [24] 袁兆成. 内燃机设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- YUAN Zhaocheng. Internal-combustion engine design [M]. Beijing: China Machine Press, 2011.
-
- 作者简介: 段桂江(通信作者), 男, 1970 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为产品设计、质量工程、制造系统工程等。
- E-mail: gjduan@buaa.edu.cn
- 王洋, 男, 1985 年出生, 博士研究生。主要研究方向为质量工程、石英挠性加速度计研制等。
- E-mail: buaawangyang@126.com